ابزار سوراخ‌کاری ارتعاشی و بررسی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی آلومینیوم 2024-T6*

(یادداشت پژوهشی)

حسین پاک طینت[۱] سعید امینی[۲] علیرضا بارانی[۳] علیرضا فدائی تهرانی[٤]

چکیده *فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی (Vibration Drilling-VD) از جمله روش‌های جدید ماشین‌کاری است که در آن ارتعاشات طولی (اغلب با فرکانس بالا و بیشتر از ۱۶kHz) و دامنه کوچک (معمولاً بین ۲ تا ۳۰μm) برای تحریک ابزار به‌کار می‌رود؛ به‌طوری که درگیری ابزار با قطعه‌کار حین پیش‌روی محوری قطع و وصل می‌گردد. در این پژوهش دو ابزار ارتعاشی برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی تحلیل و ساخته شده است. از نرم‌افزارهای المان محدود برای انجام تحلیل مودال استفاده گردیده است. ابزارهای ارتعاشی به‌گونه‌ای طراحی می‌گردند که فرکانس تشدید منطبق بر فرکانس تشدید ترانسدیوسر (مبدل صوتی) داشته باشند. برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی یک مکانیزم چرخشی طراحی و ساخته شده است. این مکانیزم قادر است که فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی را به گونه‌ای انجام دهد که دوران و ارتعاش هم‌زمان به مته اعمال گردد. پس از انجام تست‌های اولیه، تأثیر اضافه شدن ارتعاشات اولتراسونیک در فرآیند سوراخ‌کاری Al2024-T6 بررسی می‌شود و با فرآیند سوراخ‌کاری معمولی مقایسه می‌گردد. پارامترهای نیروی محوری و نوع براده در هر دو فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی و معمولی بررسی و مقایسه می‌گردند. نتایج بیانگر کاهش مؤثر نیروی محوری در سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی سوراخ‌کاری، سوراخ‌کاری ارتعاشی، Al2024-T6، اولتراسونیک.

Vibration Drilling Tool and Thrust Force Investigation in Vibratory Drilling Process of Al 2024-T6

H. Paktinat S. Amini A. Barani A. Fadaei Tehrani

Abstract *Vibratory drilling (VD)process is a new modern technology where longitudinal wave with high frequency (more than 16 kHz) and low amplitude (usually between 2 up to 30 µm) is superimposed on the movement of cutting tool, resulting in connection and disconnection of cutting tool engagement with workpiece. In this study, in order to perform vibratory drilling process, two vibration tools are designed and fabricated. ANSYS software is used to accomplish modal analysis. Using this software, it is possible to design vibration tools (horn and drill) to have resonance frequency equals to transducer frequency. A rotary mechanism is designed to perform vibratory drilling on a lathe machine. This set-up is able to do vibratory drilling process while both vibration and rotation are applied to the movement of drill. This mechanism (rotary vibratory drilling) has ability to drill various workpiece with different sizes and materials. After primary tests, the effect of is able drilling is studied and compared with conventional drilling while specimen is Al2024-T6. Thrust force and chip morphology are two studied parameters in this paper. The obtained results showed a notable reduction of thrust force in vibratory drilling process over the conventional one.*

Key Words Drilling, Vibratory Drilling, Al2024-T6, Ultrasonic.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۱/٦/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۸/۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترا، گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان. Amini.s@kashanu.ac.ir

(۳) دانشجوی دکترا، گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

(٤) دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مقدمه

مبنای فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی مانند سوراخ‌کاری معمولی می‌باشد با این تفاوت که برای بهبود شرایط ماشین‌کاری، ارتعاشات طولی نیز به حرکت مته اضافه می‌گردد. این فرآیند را می‌توان برخلاف سوراخ‌کاری اولتراسونیک (به‌کمک ذرات ساینده) برای دامنهٔ وسیعی از مواد به‌کار برد. در فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک (همراه با ذرات ساینده)، ارتعاشات اولتراسونیک از طریق یک هد ارتعاشی به ذرات ساینده معلق در گل ساینده منتقل می‌شود. این ذرات در اثر ارتعاش سرعت می‌گیرند و به سمت سطح قطعه‌کار پرتاب می‌شوند. در اثر برخورد ذرات ساینده به سطح قطعه‌کار و رخداد مکانیزم شکست ترد، ذرات براده از قطعه جدا می‌شوند. از آنجا که مکانیزم براده‌برداری در فرآیند سوراخ‌کاری اولتراسونیک شکست ترد است (به‌کمک ذرات ساینده)؛ بنابراین این فرآیند تنها برای مواد ترد کاربردی است.

محققان پژوهش‌های متنوعی روی فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی انجام داده‌اند. فرآیند ترکیب امواج اولتراسونیک با ماشین‌ابزارهای معمولی توسط کومابه و همکارانش [1] در حدود سال ۱۹۵۸شروع شد. او نشان داد که نیروی برشی پالسی مزیت‌های زیادی را از جمله جابه‌جایی گرمای برش و افزایش عمر ابزار به دنبال دارد. در سال ۱۹۹۱ تاکیاما و همکارش [2] فرآیند اعمال ارتعاش اولتراسونیک به قطعه‌کار را در سوراخکاری ارتعاشی بررسی نمود. آن‌ها بهبود در سوراخ‌کاری ارتعاشی با فرکانس بالا (High -Frequency Vibration Assisted Drilling HFVAD) آلومینیوم را نشان دادند و گزارش کردند که ارتفاع پلیسه تا ۷۵ درصد کاهش یافت. جانگ و وانگ [3] با آنالیز مسیر براده در سوراخ‌کاری به‌کمک اولتراسونیک (با ارتعاش محوری) روی مواد چقرمه و نرم یک روش جدید را برای شکستن براده با کمک اولتراسونیک پیشنهاد کردند. لی و همکارانش [4] یک کنترل شرایط ارتعاشی چندمرحله‌ای برای سوراخ‌کاری ارتعاشی مواد کامپوزیتی لایه‌ای به‌وجود آوردند. بابیستکی و همکارانش [5] سوراخ‌کاری موادی چون صفحات نازک فلزی و شیشه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سوراخ‌کاری صفحات نازک آلومینیومی بدون استفاده از پشت‌بند در سوراخ‌کاری ارتعاشی امکان‌پذیر است؛ در حالی که صفحات نازک آلومینیومی در سوراخ‌کاری معمولی خم شدند. هم‌چنین کیفیت سطح شیشه در سوراخ‌کاری ارتعاشی بهبود چشم‌گیری نسبت به سوراخ‌کاری معمولی داشت. چنگ و بون [6] نشان دادند که کاهش اندازهٔ پلیسه در سوراخ‌کاری آلومینیوم از طریق روش VD امکان‌پذیر است. وانگ و همکارانش [7] به‌طور عملی سوراخ‌کاری ارتعاشی با فرکانس کم را روی فیبر تقویت شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که سوراخ‌کاری ارتعاشی با فرکانس کم می‌تواند نیروهای محوری را کاهش دهد، اما شرایط ارتعاشی مطلوب برای شرایط برشی خاصی وجود دارد. آذرهوشنگ و اکبری [8] سوراخ‌کاری ارتعاشی اینکونل ۷۳۸LC را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که کیفیت سطح در استفاده از این روش بهبود می‌یابد. پوجانا و همکارانش [9] نشان دادند که در سوراخ‌کاری ارتعاشی با قطعه‌کار Ti6Al4V براده‌ها تمایل به خرد شدن دارند در صورتی که سوراخ‌کاری معمولی براده‌های پیوسته ایجاد می‌کند. آن‌ها دلیل این امر را اثرات اولتراسونیک و برخوردهای مداوم سر مته با براده‌ها بیان کردند. جانگ [10] ثابت کرد که کاربرد ارتعاش با فرکانس 16KHz روی قطعه اثرات افزایش صلبیت سوراخ‌کاری، کاهش لغزش مته و کاهش خطاهای اندازه سوراخ و افزایش عمر مته را دارد. لین و همکارانش [11] سوراخ‌کاری به‌کمک اولتراسونیک اینکونل 718 را مورد مطالعه قرار دادند که نتیجهٔ آن کاهش اندازهٔ براده و تغییرات کمتر گشتاور بود. هم‌چنین با تغییر فرکانس‌ها توانایی سوراخ‌کاری بهبود کمی و در مقابل عمر مته به‌طور چشم‌گیری در

کاربرد ارتعاشات با دامنه کم افزایش یافت. آنها هم‌چنین تحت شرایط خاصی عمر ابزار ۲/۷ برابر بیشتر از فرآیند سوراخ‌کاری معمولی را گزارش کردند. ما و همکارانش [12] سوراخ‌کاری به‌کمک ارتعاشات دوبعدی یا بیضوی را بر روی قطعه‌کار آلومینیوم ۵۲s مورد بررسی قرار دادند. بر طبق گزارش‌های آنها نیروی محوری تا یک‌سوم، نیروی شعاعی تا یک‌دوم و ضخامت براده از یک‌دوم تا یک‌سوم کاهش یافتند. گااو و همکارش [13] سوراخ‌کاری ارتعاشی قطعاتی از جنس Al6061-T6 و فولاد SS41 را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق گزارش‌های آن‌ها لغزش سر مته و کیفیت سطح سوراخ در سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی بهبود یافت اما عمر مته در سوراخ‌کاری ارتعاشی بدتر شد. چنگ و همکارش [14] نیروی محوری را در سوراخ‌کاری ارتعاشی Al6061-T6 مدل کردند. بر اساس گزارش‌های ارول و همکارانش [15] تورق سوراخ در سوراخ‌کاری ارتعاشی پلاستیک‌های تقویت‌شده نسبت به سوراخ‌کاری معمولی بهبود یافت. چنگ و همکارش [16] مدلی برای ارتفاع پلیسه در سوراخ‌کاری Al6061-T6 ارائه کردند و بر اساس گزارش‌های آن‌ها با استفادهٔ درست از ارتعاشات اولتراسونیک می‌توان ارتفاع پلیسه را کاهش داد. یوهایی و همکارانش [17] گزارش کردند که می‌توان در فرآیند میکرو سوراخ‌کاری ارتعاشی با افزایش نرخ پیش‌روی به زمان ماشین‌کاری کمتری رسید در حالی که عمر ابزار حفظ می‌گردد. نوجبایر و استول [18] از طریق آزمایش نشان دادند که در سوراخ‌کاری ارتعاشی آلیاژهای آلومینیوم عمر ابزار نسبت به روش معمولی بهتر می‌گردد. در این پژوهش دو ابزار ارتعاشی با دو قطر مته ۸mm و ۵mm ساخته شده است. مکانیزمی چرخشی برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی دورانی طراحی و ساخته شد. پارامترهایی از قبیل نیروی محوری و نوع براده بررسی و با فرآیند سوراخ‌کاری معمولی مقایسه گردید. نتایج بیانگر بهبود در استفاده از سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی می‌باشد.

طراحی، ساخت و تست ابزار ارتعاشی

به‌طور کلی سه مود ارتعاشی وجود دارد : خمشی، پیچشی و طولی. برای طراحی یک ابزار ارتعاشی سوراخ‌کاری نیاز به مود طولی مجموعه می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزارهای المان محدود مانند انسیس برای انجام تحلیل ارتعاشی استفاده شد. یک ابزار ارتعاشی سوراخ‌کاری شامل متمرکزکننده و مته می‌باشد. در طراحی ابزار ارتعاشی سوراخ‌کاری باید به چند نکته توجه شود:

(۱) فرکانس ارتعاشی طولی ابزار منطبق با فرکانس ارتعاشی طولی ترانسدیوسر باشد (در این پژوهش فرکانس طبیعی ترانسدیوسر ۲۰kHz است).

(۲) قطر ابتدایی متمرکزکننده (هورن) کمتر از قطر ترانسدیوسر نباشد (به‌دلیل جلوگیری از ورود امواج صوتی از سطح ترانسدیوسر به هوا).

(۳) برای کاهش اثر ارتعاشات عرضی در حالت کشش کامل و یا فشار کامل، قطر متمرکزکننده باید کمتر از یک چهارم طول موج باشد.

(٤) برای کاهش اتلاف انرژی و متمرکز کردن انرژی اولتراسونیک، قطر انتهایی متمرکزکننده باید تا حد امکان کوچک باشد.

(۵) برای داشتن یک ابزار ارتعاشی خوب که هم ارتعاشات را به‌خوبی منتقل کند و هم باعث تقویت دامنهٔ ارتعاشات شود، ترکیبی از شکل پروفیل‌های مناسب استفاده شود. توجه به این نکات باعث افزایش راندمان فرآیند می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که برای طراحی یک انتقال‌دهندهٔ خوب علاوه بر توجه بر نکات موجود و انجام تحلیل‌های متعدد با نرم‌افزار، نیاز به تجربهٔ کاری بسیار بالایی می‌باشد. این انتقال‌دهنده و تقویت کنندهٔ ارتعاش به‌ظاهر شکلی ساده دارد اما برای طراحی این ابزار نیاز به تحلیل‌های گسترده و تستهای عملی می‌باشد تا بتوان بعد از تحلیل‌های متعدد و

ساخت چند نمونهٔ آزمایشی به ابزار مناسب دست پیدا کرد. هم‌چنین لازم به ذکر است که ترانسدیوسر مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت سوئیسی MPI است و نیاز به طراحی ترانسدیوسر نمی‌باشد. مشخصات و فرکانس طولی تشدید این ترانسدیوسر از طرف شرکت سازنده معرفی شده است و فقط نیاز به طراحی ابزاری (متمرکزکننده و مته) می‌باشد که فرکانس طولی تشدید مجموعه منطبق بر فرکانس طولی تشدید ترانسدیوسر باشد.

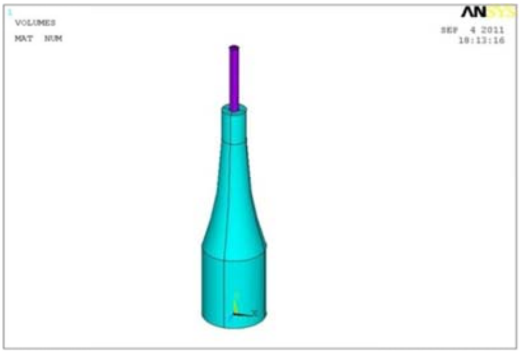
در این مطالعه دو ابزار ارتعاشی طراحی و ساخته شد. در ابتدا ابزار ارتعاشی مناسب برای مته ۸mm طراحی گردید. برای داشتن دقت کافی در روند حل تحلیل، متمرکزکننده به‌صورت سه‌بعدی مدل گردید. برای انجام تحلیل ارتعاشی از نرم‌افزار انسیس استفاده گردید. مته به طول ۱۰۰mm و به‌صورت یک استوانهٔ کامل و با قطر معادل مدل‌سازی شد. متمرکزکننده ارتعاشی از جنس Al7075 و مته از جنس فولاد تندبر انتخاب گردیدند.

در نرم‌افزار انسیس سه مرحلهٔ کلی برای انجام یک تحلیل مودال وجود دارد : پیش‌پردازش، حل کردن و پس‌پردازش. در مرحلهٔ پیش‌پردازش انتخاب المان، خواص ماده یا مواد، مدل‌سازی هندسی، مش‌بندی و شرایط مرزی انجام می‌شود. تحلیل مودال به‌صورت سه‌بعدی انجام شد تا علاوه بر افزایش دقت تحلیل بتوان مودهای ارتعاشی دیگر را نیز مشاهده کرد. از دو المان solid92 و solid95 برای انجام تحلیل استفاده گردید. خواص آلومینیوم ۷۰۷۵ و فولاد تندبر به‌ترتیب برای متمرکزکننده و مته به نرم‌افزار داده شد. جدول (۱) این مقادیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱ ضرائب جنس‌های موجود در آنالیز مودال

جنس	مدول یانگ (GPa)	ضریب پوآسون	چگالی (kg/m^3)
آلومینیوم ۷۰۷۵	۷۱/۷	۰/۳۳	۲۸۱۰
فولاد تندبر	۲۱۰	۰/۳	۷۸۰۰

ابتدا نصف مدل به‌صورت دوبعدی ایجاد گردید و سپس با دوران مدل حول خط تقارن مدل سه‌بعدی ابزار ارتعاشی ایجاد شد. متمرکزکنندهٔ مورد نظر، یک متمرکزکنندهٔ سه المانی می‌باشد که دو المان استوانه‌ای (ابتدا و انتهای متمرکزکننده) به یک المان شعاعی شکل متصل شده است. المان اول به‌صورت پروفیل استوانه‌ای شکل طراحی شد تا این امکان را داشته باشد که بتوان با آن در مدت زمان طولانی بدون گرم شدن مجموعه کار کرد. سپس سطح مقطع با یک پروفیل شعاعی به‌طور آرام کوچک می‌شود تا علاوه بر متمرکز کردن انرژی اولتراسونیک از بازگشت امواج به ترانسدیوسر جلوگیری کند. بعد از آن سطح مقطع به‌صورت پروفیل استوانه‌ای تا انتها ادامه می‌یابد تا اتصال مته به متمرکزکننده راحت‌تر انجام شود (شکل ۱).



شکل ۱ مدل سه‌بعدی ابزار ارتعاشی

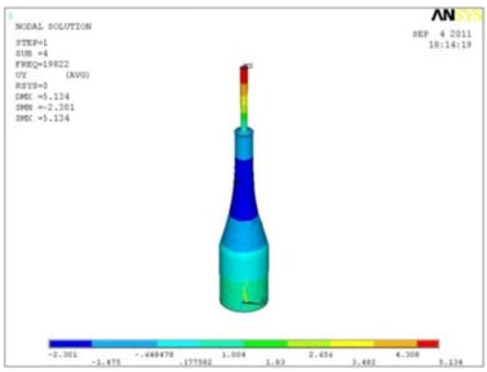
پس از دادن ضرایب هر جنس به جزو مربوط مدل مش‌بندی می‌شود (شکل ۲).

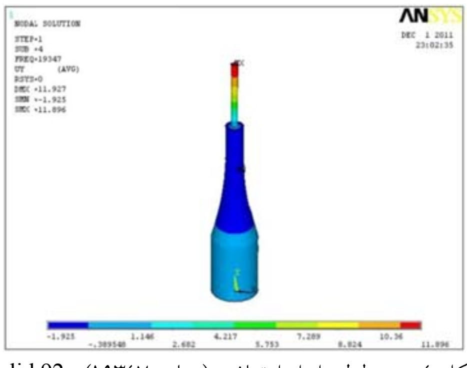


شکل ۲ مدل مش‌بندی شده

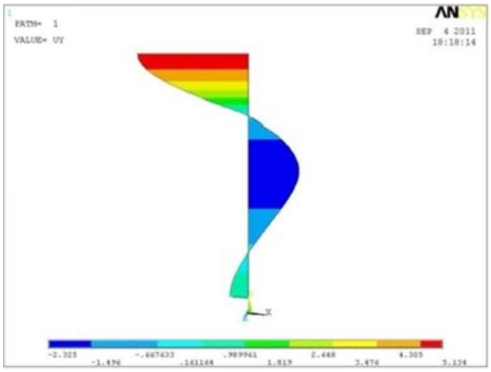
در مرحلهٔ حل کردن، انتخاب نـوع تحلیـل و نـوع حلگر انجام می‌شود. در این قسمت تحلیل مودال برای تعیین مودهای ارتعاشی ابزار ارتعاشی انتخاب شد و در نهایت حل‌گر Block Lanczos به‌دلیل سه‌بعـدی بـودن مدل و حجم زیاد محاسبات انتخـاب گردیـد. در ادامـه اطلاعـات مـدل در نـرم‌افـزار بـه‌صـورت ماتریسـی درمی‌آیند. خصوصیات مدل بـه‌صـورت مـاتریس‌هـای جرم و سـختی؛ و نیروهـا و جابـه‌جـایی‌هـا بـه شـکل برداری درمی‌آیند و توسط نرم‌افزار حل می‌شوند. زمان انجام تحلیل بسته به نوع تحلیل، هندسهٔ قطعه، دوبعدی یا سه‌بعدی بودن تحلیل، شرایط مرزی و توان کامپیوتر از چند دقیقه تا چند ساعت طول خواهد کشید.

در مرحلهٔ پس‌پردازش می‌توان نتایج را به‌صـورت عملی مشاهده کرد. مودها با بسامدهای مختلف همـراه با انیمیشن حرکتی آن‌ها توسط نرم‌افزار قابـل مشـاهده می‌باشد (شکل‌های ٤ و ۳).


شکل ۳ مود طولی ابزار ارتعاشی (بسامد ۱۹۸۲۲)– solid 95


شکل ٤ مود طولی ابزار ارتعاشی (بسامد ۱۹۳٤۷)– solid 92

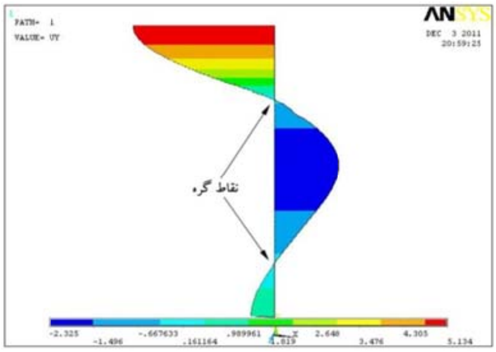
شکل (۵) موج انتشار یافتـه در ابـزار ارتعاشـی را نشان می‌دهد.


شکل ۵ شکل موج انتشار یافته در ابزار ارتعاشی

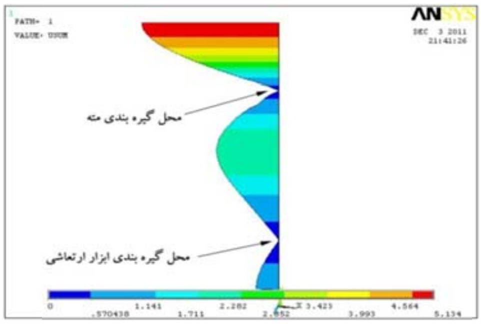
ارتعاش طولی یا منبسـط و منقـبض شـدن طـولی متمرکزکننده به‌دلیل ضـریب پوآسـون باعـث تغییـر در ابعاد متمرکزکننده در سه جهت می‌شود. از طرفی برای آماده‌سازی یک سیسـتم ارتعاشـی نیـاز بـه گیـره‌بنـدی سیستم یا مجموعه در نقاط خاصی می‌باشد که در ایـن نقاط مجموعه حرکت نداشته باشد. در اصل این نقـاط، نقاط تکیه‌گاه مجموعه می‌باشند. به‌دلیل این‌که مجموعه در حال ارتعاش اولتراسونیک می‌باشد ایـن نقـاط بایـد بـه‌درسـتی انتخـاب شـوند تـا نخسـت در ایـن نقـاط جابه‌جایی وجود نداشته باشد و عـلاوه بـر گیـره‌بنـدی مناسب از باز شدن اتصـالات جلـوگیری شـود و دوم، انتخاب نادرست این نقاط علاوه بـر ایـن‌کـه مودهـای ارتعاشی را تغییر می‌دهد، باعث گرم شدن بسیار شدید سیستم و خرابی ترانسدیوسـر خیلـی زودتـر از موعـد مقرر می‌شود. برای پیدا کـردن ایـن نقـاط مـی‌تـوان از روش‌های متفاوتی مانند نرم‌افزارهای اجزا محدود و یـا آزمایش‌هایی بعد از ساخت متمرکزکننده استفاده کـرد. به‌دلیل دقت خوب نرم‌افزارهای اجزا محدود، این نقاط به‌کمک نرم‌افزارها تعیین شدند. شکل (٦) منحنی تغییر شکل متمرکزکننده را در راسـتای محـور متمرکزکننـده نشان می‌دهد.

در نرم‌افزارهـای المـان محـدود بـه‌طـور خودکـار

مقداری دامنه به موج ورودی می‌شود و براساس آن موج انتشاریافته در راستای ابزار ارتعاشی و هم‌چنین دامنۀ موج خروجی را می‌توان رسم کرد. هم‌چنین شکل (۷) منحنی تغییر شکل متمرکزکننده را در سه جهت (برآیند) نشان می‌دهد.

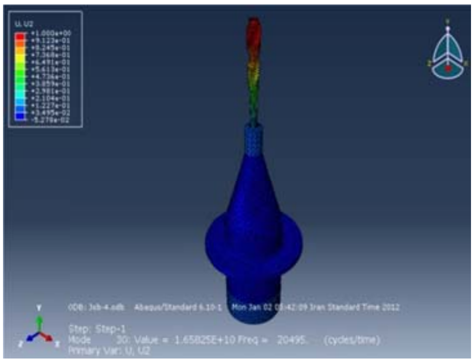


شکل ٦ شکل موج در راستای محور طولی متمرکزکننده

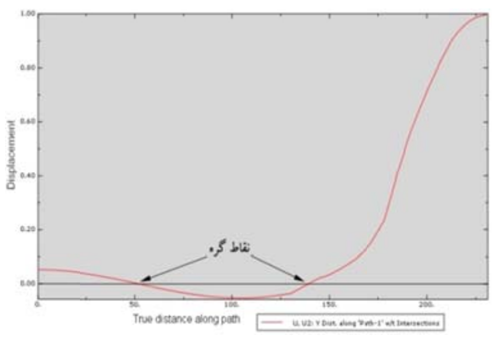


شکل ۷ شکل موج برآیند

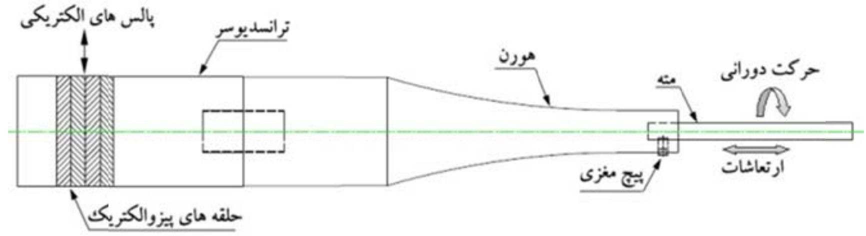
مشاهده می‌شود نقطه یا نقاطی وجود دارد که ارتعاش در آن در تمام جهات صفر می‌باشد. این مکان‌ها به نقاط گره معروف هستند. ابزار ارتعاشی اول مورد استفاده در این پژوهش یک ابزار ارتعاشی دوگره‌ای می‌باشد که این گره‌ها در شکل مشخص شده‌اند. گره اول در انتهای قسمت استوانه‌ای از کف متمرکزکننده واقع شده است که این نقطه برای گیره‌بندی ابزار ارتعاشی انتخاب شد. هم‌چنین گره دوم به‌گونه‌ای طراحی گردید که گیره‌بندی مته توسط پیچ مغزی در نزدیکی همین نقطه انجام شود تا ارتعاشات اولتراسونیک باعث باز شدن پیچ نشود. در ادامه برای بهینه‌سازی شرایط ارتعاشی شکل متمرکزکننده و قطر مته تغییر کرد. برای ابزار ارتعاشی جدید به قطر مته 5mm اضافه شد. برای دقت بیشتر سعی شد که مته به‌صورت شکل واقعی مدل گردد. هم‌چنین به‌دلیل این که مدل‌سازی مته در نرم‌افزار انسیس کار مشکلی بود، از نرم‌افزار آباکوس برای انجام تحلیل مودال استفاده گردید. برای این کار ابتدا مدل هندسی مته و متمرکزکننده در نرم‌افزار کتیا (Catia) طراحی گردید و سپس ابزار ارتعاشی در نرم‌افزار آباکوس تحلیل مودال شد. شکل (۸) تحلیل مودال ابزار ارتعاشی را در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد.


شکل ۸ تحلیل مودال ابزار ارتعاشی در نرم‌افزار آباکوس

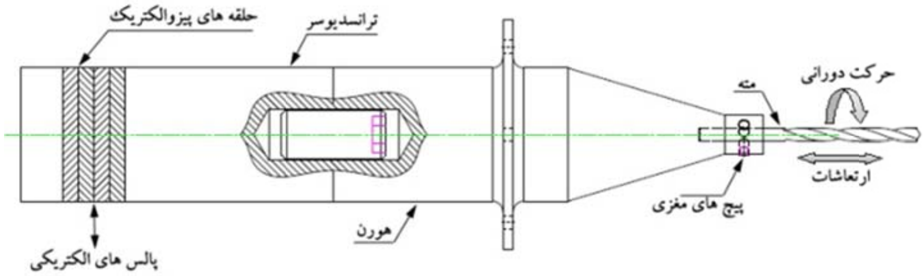
این ابزار نیز مشابه ابزار قبلی یک ابزار دوگره‌ای می‌باشد. در گره اول فلنچی ایجاد گردید تا گیره‌بندی ابزار ارتعاشی راحت‌تر نسبت به ابزار ارتعاشی قبلی انجام شود. سعی شد تا حد امکان گره دوم در نزدیکی محل اتصال مته به متمرکزکننده قرار گیرد. شکل (۹) نقاط گره را برای این ابزار ارتعاشی نشان می‌دهد.



شکل ۹ انتشار موج در راستای ارتعاش



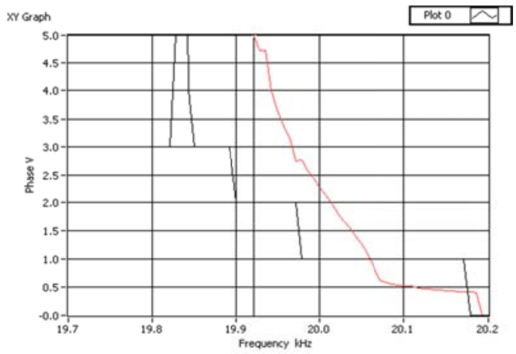
شکل ۱۰ طرح شماتیکی ابزار ارتعاشی، مته ۸mm



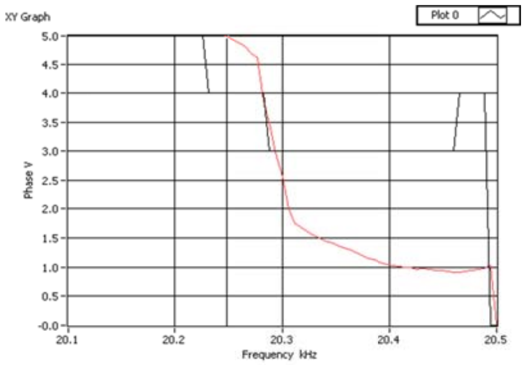
شکل ۱۱ طرح شماتیکی ابزار ارتعاشی، مته ۵mm

اگر از نقطهٔ صفر بر روی محور عمودی خطی موازی محور افقی رسم شود، این خط نمودار را در دو نقطه قطع خواهدکرد. این نقاط به نقاط گره معروف هستند. هم‌چنین بسامد طراحی کمی بزرگ‌تر از مقدار معمول طراحی گردید (۲۰٤۹۵ سیکل در ثانیه). دلیل این امر آن است که بسامد تشدید ابزار ارتعاشی در حالت درگیری افت پیدا خواهد کرد. این افت باعث می‌شود که بسامد ابزار ارتعاشی در حین درگیری کمتر شود و به بسامد تشدید ترانسدیوسر نزدیک‌تر گردد. پس از تحلیل و استخراج ابعاد مورد نظر می‌توان ابزار ارتعاشی را مونتاژ کرد. ابزار ارتعاشی شامل ترانسدیوسر، متمرکزکننده و مته می‌باشد. شکل‌های (۱۱ و ۱۰) شکل شماتیک این دو ابزار را نشان می‌دهد.

پس از ساخت و مونتاژ ابزار ارتعاشی می‌توان آن را تست کرد. ژنراتور مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت MPI می‌باشد. این ژنراتور قادر است که در محدودهٔ انتخاب شده توسط اپراتور، دامنهٔ انتخابی را جاروب کند و ما را از داشتن یا نداشتن بسامد تشدید آگاه سازد. این کار برای هر دو ابزار ارتعاشی انجام شده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).



شکل ۱۲ اسکن ابزار ارتعاشی، مته ۸mm



شکل ۱۳ اسکن ابزار ارتعاشی، مته ۵mm

مشاهده می‌شود اختلاف کمی بین نتایج به‌دست آمده از حل تحلیل مودال و نتایج عملی وجود دارد که بیانگر دقت کافی در روند حل تحلیل اجزا محدود می‌باشد. لازم به ذکر است که در شکل‌های (۱۳ و ۱۲) محور افقی، مقادیر بسامد و محور عمودی، مقادیر فاز را نشان می‌دهد. طبق اطلاعات داده شده در کاتالوگ دستگاه محل برخورد خط قرمز (فاز) با عدد ۲/۵ مقدار بسامد تشدید است.

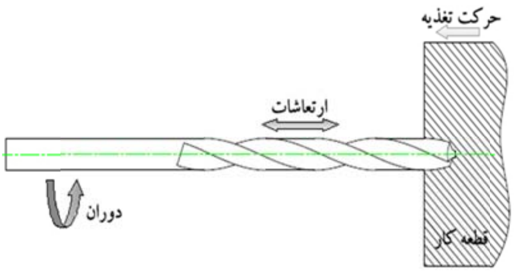
طراحی و ساخت سیستم چرخشی

از روش‌های متفاوتی برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی استفاده شده است؛

(۱) ارتعاش به ابزار و دوران به قطعه.

(۲) ارتعاش به قطعه و دوران به ابزار.

در هر دو روش مذکور محدودیت‌هایی از جمله جنس قطعه‌کار و ابعاد آن مطرح می‌باشد. در این پژوهش برای رفع این محدودیت‌ها ارتعاش و دوران هر دو به ابزار داده خواهد شد و قطعه‌کار به سمت متهٔ در حال دوران و ارتعاش حرکت خواهد کرد. شکل (١٤) طرح شماتیکی این حرکات را نشان می‌دهد.

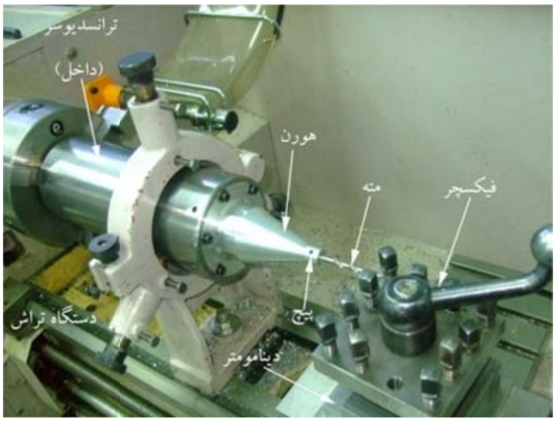


شکل ١٤ دوران و ارتعاش هر دو به ابزار

برای ایجاد حرکت ارتعاشی از ابزار ارتعاشی استفاده می‌شود. شکل (۱۵) شکل واقعی این ابزار ارتعاشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است ابزار ارتعاشی شامل متمرکزکننده و مته به ترانسدیوسر متصل شده است. خود ترانسدیوسر که قرص‌های پیزوالکتریک روی آن نصب گردیده است، به ژنراتور متصل شده است. این پیزوالکتریک‌ها تحت ولتاژ و بسامد مناسب و در اثر پدیدهٔ پیزوالکتریک شروع به ارتعاش می‌کنند. برای اعمال دوران به ابزار ارتعاشی و حرکت تغذیه به قطعه‌کار از مکانیزم شکل (١٦) استفاده گردید.

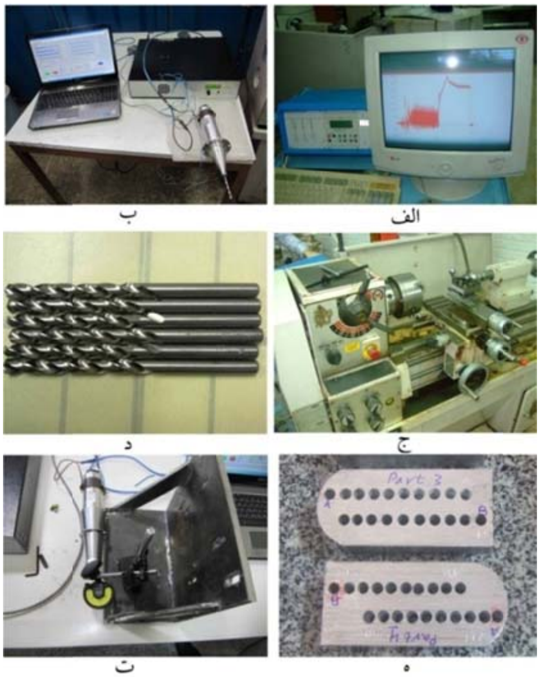


شکل ۱۵ ابزار ارتعاشی، مته 5mm



شکل ١٦ مجموعهٔ سوراخ‌کاری ارتعاشی چرخشی، مته 5mm

همان‌طور که از شکل (١٦) مشاهده می‌شود استفاده از این مکانیزم، توانایی سوراخ‌کاری قطعات با شکل و اندازهٔ مختلف را ایجاد می‌کند. این قابلیت به‌دلیل امکان بستن قطعه‌کاری ثابت در یک فیکسچر مخصوص و ثابت می‌باشد. هم‌چنین به‌خاطر عدم اعمال ارتعاش به قطعه‌کار (عدم تأثیر قطعه‌کار در بسامد طبیعی مجموعه ارتعاشی) امکان استفاده از این فرآیند برای سوراخ‌کاری ارتعاشی انواع جنس‌های قطعه‌کار وجود دارد.



شکل ۱۷ وسایل آزمایش؛ الف) دینامومتر، ب) ژنراتور همراه با ابزار ارتعاشی، ج) دستگاه تراش، د) مته از جنس فولاد تندبر، ه) قطعه‌کار، ت) ساعت برای اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش.

وسایل آزمایش

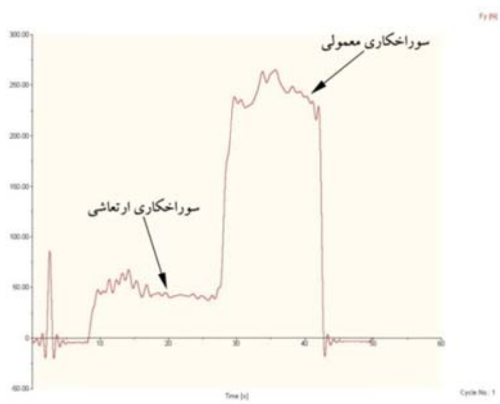
وسایل مورد استفاده در آزمایش‌ها عبارتند از:

- دستگاه تراش اونیورسال (AJAX-AJ 725): برای انجام عملیات سوراخ‌کاری.
- ژنراتور (MPI GENERATOR): برای تبدیل جریان الکتریکی ۵۰Hz به جریان الکتریکی با بسامد بالا. دامنهٔ بسامد ژنراتور ۵ تا ۷۰kHz و توان آن ۳۰۰۰W می‌باشد.
- دینامومتر (KISTLER- 9257B): برای اندازه‌گیری نیروی محوری در سوراخ‌کاری.
- مته: مته به دو قطر ۵ و ۸ میلی‌متر و از جنس فولاد تندبر.
- جنس قطعه‌کار: آلومینیوم 2024-T6 به ابعاد ۲۰×۳۰×۸۵ mm.
- میکروسکوپ نوری (Dino-Lite Digital Microscope): برای تصویر برداری.
- ساعت اندازه‌گیری MAHR با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر: برای اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش.

در آزمایش‌های انجام شده، سوراخ‌کاری ارتعاشی بدون استفاده از خنک‌کار انجام شد. شکل (۱۷) وسایل آزمایش را نشان می‌دهد.

نحوهٔ انجام آزمایش‌ها و پارامترهای مورد آزمایش

پس از آماده سازی مجموعه ابزار ارتعاشی چرخشی، دینامومتر روی میز عرضی دستگاه تراش نصب شد و سوراخ‌کاری روی قطعه‌کار مکعبی از جنس Al2024-T6 صورت گرفت. برای انجام هر آزمایش ابتدا دستگاه تراش طبق سرعت دورانی و پیش‌روی مورد نظر تنظیم شد. سپس به‌منظور مشاهدهٔ بهتر نتیجهٔ استفاده از امواج اولتراسونیک طولی و تفاوت آن با سوراخ‌کاری معمولی، ابتدا به ابزار ارتعاش داده شد و پس از پیمودن نیمی از عمق سوراخ در حین انجام عملیات، ارتعاش اولتراسونیک قطع شد و ادامه سوراخ‌کاری بدون ارتعاش انجام شد. در این حالت مقایسهٔ نیروی محوری در دو فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی و معمولی بهتر انجام می‌شود. شکل (۱۸) نمودار نیروی محوری سوراخ‌کاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸ نمودار نیرو در دو فرآیند سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری ارتعاشی، سرعت برشی ۹۵ دور بر دقیقه، پیش‌روی ۰/۱۰۴ میلی‌متر بر دور، قطر مته ۸mm

هدف اصلی این پژوهش بررسی عملی نیروی سوراخ‌کاری با تغییرات سرعت برشی و نرخ پیش‌روی در دو فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی و معمولی و مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. سرعت‌های برشی و نرخ‌های پیش‌روی با توجه به قطر مته و داشتن شرایط ارتعاشی مطلوب انتخاب شدند. جدول‌های (۲ و ۳) این مقادیر را برای دو متهٔ استفاده شده در این مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۲ پارامترهای مورد آزمایش، مته ۸mm

مقادیر پارامترها	پارامترها
۸	دامنهٔ ارتعاش (μm)
۰/۱۰٤، ۰/۲۰۸، ۰/۳٤۸	سرعت پیش‌روی (mm/rev)
۹۵، ۲۳۰، ۳۸۰	سرعت دورانی (rev/min)

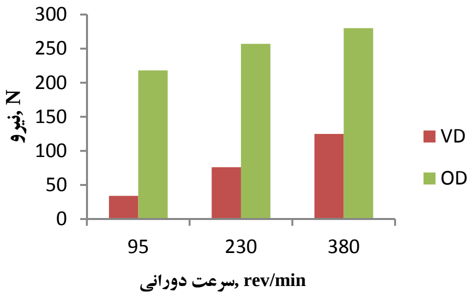
جدول ۳ پارامترهای مورد آزمایش، مته ٥mm

مقادیر پارامترها	پارامترها
٥	دامنهٔ ارتعاش (μm)
۰/۱۰٤، ۰/۲۰۸، ۰/۳٤۸	سرعت پیش‌روی (mm/rev)
٤٦۰، ۷٥٥، ۱۲٥٥	سرعت دورانی (rev/min)

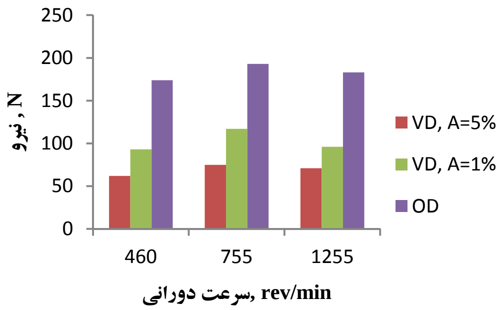
در این پژوهش برای عدم تأثیر سایش ابزار یا لبهٔ انباشته بر روی نیروی محوری در سوراخ‌کاری معمولی، پس از انجام یک سوراخ کامل، مته تعویض گردید و برای سوراخ‌کاری جدید متهٔ جدیدی جایگزین شد. هم‌چنین نیروی اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر چه در فرآیند سوراخ‌کاری معمولی و چه در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی، نیروی متوسط در کل عمق سوراخ می‌باشد.

نتایج و بحث

شکل‌های (۲۰ و ۱۹) تأثیر سرعت برشی را بر روی نیروی محوری نشان می‌دهد. برای بررسی و مقایسهٔ بهتر نتایج، نمودارهای مربوط به سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری ارتعاشی در یک نمودار ترسیم شدند. در نمودارها محور افقی بیانگر سرعت برشی و محور عمودی نیروی محوری سوراخ‌کاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹ نمودار تغییرات نیرو نسبت به سرعت برشی در پیش‌روی ۰/۱۰٤mm/rev، مته ۸mm

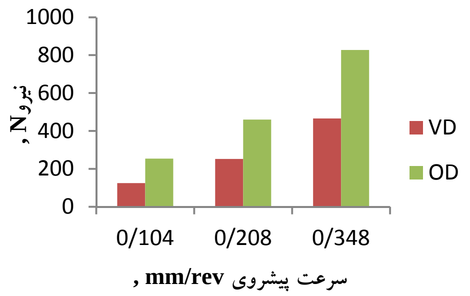


شکل ۲۰ نمودار تغییرات نیرو نسبت به سرعت برشی در پیش‌روی ۰/۱۰٤mm/rev، مته ٥mm

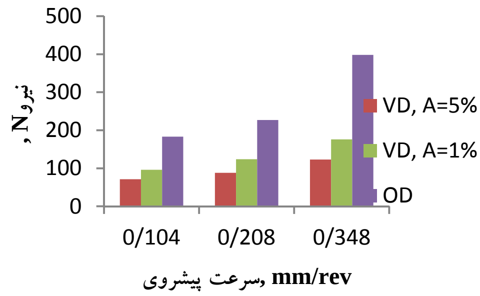
به‌طور کلی با افزایش سرعت برشی نیروی اصطکاک روی سطح قلم و نیروی سوراخ‌کاری کاهش می‌یابد و این در صورتی است که لبه انباشته به‌وجود نیاید. افزایش نیروی برشی در سرعت‌های کم به‌دلیل تشکیل لبهٔ انباشته می‌باشد. با توجه به نمودارها با افزایش سرعت برشی نیروی محوری در سوراخ‌کاری با ابزار ارتعاشی با متهٔ ۸mm افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو به‌دلیل تشکیل لبهٔ انباشتهٔ زیاد در ماشین‌کاری آلومینیوم می‌باشد. در نمودارهایی که سوراخ‌کاری با مته ٥mm انجام شده است، در ابتدا

نیروی محوری بـا افـزایش سـرعت افـزایش و سـپس کـاهش مـی‌یابـد. افـزایش نیـرو مربـوط بـه محـدوده سرعت‌هایی است کـه لبـهٔ انباشـته تشـکیل مـی‌گـردد. کاهش نیرو در سرعت‌های بالاتر بـه‌دلیـل کـاهش لبـهٔ انباشته می‌باشد. در واقع در سرعت‌هـای بـالاتر درجـه حرارت در منطقهٔ ماشین‌کاری افزایش می‌یابد و باعـث نرم‌تر شدن لبه انباشـته مـی‌گـردد و انـدازهٔ آن کـاهش می‌یابد. نیروها در استفاده از مته ۵mm به‌دلیـل کـاهش سطح مقطع برادهٔ تغییر شکل نیافته، نسبت به متهٔ ۸mm کوچک‌تر می‌باشند.

شکل (۲۲ و ۲۱) تغییـرات نیـروی محـوری را در سـوراخ‌کـاری ارتعاشـی و معمـولی نسـبت بـه نـرخ پیش‌روی نشان می‌دهند.



شکل ۲۱ نمودار تغییرات نیرو نسبت به پیش‌روی در سرعت برشی ۳۸۰rev/min، مته ۸mm



شکل ۲۲ نمودار تغییرات نیرو نسبت به پیش‌روی در سرعت برشی ۱۲۵۵rev/min، مته ۵mm

همان‌گونه که از نمودارها مشخص است با افزایش نرخ پیش‌روی نیـروی محـوری نیـز در سـوراخ‌کـاری افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که بر اساس مکانیک برش فلزات هر چه میزان بار بیشتر شود در اصل یعنی سطح مقطع برادهٔ تغییر شکل نیافته بزرگ‌تر می‌شود، لذا شکل گرفتن براده مشکل‌تر می‌شود و بـه همـین دلیـل نیروی محوری افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقـادیر دامنـهٔ ۱٪ و ۵٪ توسط دستگاه ژنراتور اولتراسونیک تنظیم شد که افزایش توان اولتراسونیک را نشان می‌دهـد. کـاهش بیشتر نیروها در دامنهٔ ۵٪ به این علت است که در ایـن حالت ژنراتور تـوان بیشـتری مصـرف کـرده و تحـت نیروهای ماشین‌کاری کمتر از حالـت رزونـانس خـارج شده است. مهم‌ترین دستاورد این پژوهش کاهش مؤثر نیروی محوری سوراخ‌کـاری در فرآینـد سـوراخ‌کـاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی می‌باشد کـه در پژوهش‌های قبلی تا این حد کاهش نیرو (حتی بر روی جنس مشابه) گزارش نشده است. دلیل کـاهش بسـیار مؤثرتر نیرو در این پژوهش بـه طراحـی چنـدین ابـزار ارتعاشـی گونـاگون، تسـت عملـی ابـزار ارتعاشـی و هم‌چنین گیـره‌بنـدی مناسـب مجموعـه در نقـاط گـره مربوط می‌شود.

برای مقایسهٔ سرعت ارتعاش ابزار بر روی نیـروی محوری پارامتری تحت عنوان نسبت سـرعت تعریـف شـد. ایـن نسـبت عبـارت اسـت از مـاکزیمم سـرعت ارتعاشی به سرعت ماشین‌کاری.

اگر u رابطهٔ مسیر ابزار برنده باشد آن‌گاه:

$$u = A\sin(\omega t) \qquad (۱)$$

که A دامنهٔ ارتعـاش، t زمـان و اگـر f بسـامد ارتعـاش باشد آن‌گاه $\omega = 2\pi f$. برای بـه‌دسـت آوردن سـرعت ارتعاشی باید از u مشتق گرفت.

$$\dot{u} = A\omega \cos(\omega t) \qquad (۲)$$

طبق رابطهٔ (۲) مـاکزیمم سـرعت ارتعاشـی برابـر $A\omega$ است. بنابراین نسبت سرعت را می‌توان از رابطـهٔ

زیر محاسبه کرد.

$$\text{نسبت سرعت (SR)} = \frac{\text{سرعت ارتعاش}}{\text{سرعت ابزار}}$$

$$= \frac{2\pi A f}{N \times F} \qquad (۳)$$

که

A: دامنهٔ ارتعاش (mm)

f: بسامد (min^{-1})

N: سرعت دورانی (rev/min)

F: سرعت پیش‌روی (mm/rev)

این پارامتر برای ابزار ارتعاشی با متهٔ ۸mm محاسبه شده و در شکل (۲۳) آورده شده است.



شکل ۲۳ تأثیر نسبت سرعت SR روی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی، مته ۸mm

مطابق شکل (۲۳) هر چه نسبت سرعت بیشتر باشد کاهش نیرو نیز بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر هر چه زمان درگیری ابزار با قطعه‌کار کمتر گردد، اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار بیشتر کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به کاهش نیرو می‌گردد.

شکل (۲٤) تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک را بر روی شکل براده نشان می‌دهد.

در تمام فرآیندهای ماشین‌کاری چگونگی شکل‌گیری براده و نوع آن یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که شرایط ماشین‌کاری را تعیین می‌کند. در کل تشکیل براده به سه صورت تشخیص داده شده است: (۱) برادهٔ ممتد، (۲) برادهٔ ممتد با لبهٔ انباشته و (۳) برادهٔ منفصل. از این میان براده‌های پیوسته بدترین شرایط را دارند. این براده‌ها نه تنها از نظر تشکیل لبهٔ انباشته نسبت به بقیه براده‌ها حادتر هستند بلکه با پیچیده شدن به دور ابزار شرایط بدی در محیط ماشین‌کاری فراهم می‌کنند. به همین دلیل در فرآیند ماشین‌کاری ایجاد براده‌های منفصل به‌دلیل عدم تشکیل لبهٔ انباشته و شرایط ماشین‌کاری بهتر، نسبت به براده‌های ممتد ترجیح داده می‌شوند. براده‌ها در سوراخ‌کاری ارتعاشی به‌صورت منقطع هستند. در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی حرکت ارتعاشی ابزار خود شبیه به یک براده‌شکن عمل می‌کند و باعث می‌شود که براده‌ها از حالت پیوسته خود خارج شوند و یا به‌دلیل ضربات وارد به براده در حال جدا شدن از قطعه‌کار شکست براده‌ها بهتر می‌شود.



شکل ۲٤ تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر روی شکل براده، الف) سوراخ‌کاری معمولی، ب) سوراخ‌کاری ارتعاشی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی نیروی محوری و شکل براده در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی و مقایسهٔ آن با سوراخکاری معمولی پرداخته شد. ابزار ارتعاشی برای دو مته به قطر ۸ و ۵mm برای انجام فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی طراحی و ساخته شد. تحلیل

مودال برای رسیدن به مود طولی ابزار ارتعاشی و منطبق با بسامد تشدید ترانسدیوسر با نرم‌افزارهای المان محدود انجام گردید. برای ایجاد قابلیت ارتعاش و دوران به مته، یک سیستم سوراخ‌کاری ارتعاشی چرخشی طراحی و ساخته شد. این سیستم قادر است که به‌طور هم‌زمان قابلیت دوران و ارتعاش را به ابزار برش (مته) بدهد. پس از مونتاژ مجموعه و اطمینان از عملکرد صحیح و مناسب ابزار ارتعاشی، آزمایش‌ها بر روی قطعه‌کار Al2024-T6 انجام گردید. آزمایش‌ها در سرعت‌ها و نرخ‌های پیش‌روی متفاوت انجام شد و نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به سوراخ‌کاری معمولی مقایسه گردید و این نتایج حاصل گردید:

- نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتعاشی نسبت به فرآیند سوراخ‌کاری معمولی کاهش می‌یابد.
- براده‌ها در سوراخ‌کاری ارتعاشی به‌صورت منقطع و ناپیوسته می‌باشند.
- با افزایش سرعت پیشروی، نیرو در هر دو فرآیند سوراخکاری معمولی و سوراخکاری ارتعاشی افزایش می‌یابد.
- در فرآیند سوراخکاری ارتعاشی، با افزایش دامنهٔ ارتعاش نیروی محوری کاهش می‌یابد.

مراجع

1. Kumabe, J., Fuchizawa, S., Soutome, T., Soutome, Y. and Nishimoto, Y., "Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics", Precision Eng; Vol. 11, No. 2, pp. 71-77, (1989).
2. Takemaya, H. and Kato, S., "Burrless drilling by means of ultrasonic assistance", *Annals of CIRP*; Vol. 40, No. 1, pp. 83-86, (1991).
3. Zhang, D. and Wang L., "Investigation of chip in vibration drilling", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 38, pp.165-176, (1998).
4. Li, Z.J., Hong, M.S., Wang, L.J., Zhao, H.W., Su, H. and Wei, Y.L., "Machining accuracy analysis for step multi-element varying parameter vibration drilling of laminated composite materials", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 760-768, (2003).
5. Babitsky, V.I., Astashev, V.K. and Meadows A., "Vibration excitation and energy transfer during ultrasonically assisted drilling", *Journal of Sound and Vibration*; Vol. 308, pp. 805-814, (2007).
6. Chang S.S.F., Bone G.M., "Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance", *International Journal of Robotics Computer-Integrated Manufacturing*; Vol. 21, pp. 442 450, (2004).
7. Wang, X., Wang, L.J. and Tao, J.P., "Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics", *Journal of Materials Processing Technology*; Vol. 148, 2004, pp 239-244.
8. Azarhoushang, B. and Akbari, J., "Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1027–1033, (2007).
9. Pujana J., Rivero A., Celaya A. and Lopez de Lacalle, L.N., "Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 500-508, (2009).
10. Zhang, D.Y., Feng, X.J., Wang, L.J. and Chen, D.C., "Study on the drill skidding motion in ultrasonic vibration microdrilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*; Vol. 34, 1994, pp 847-857.
11. Liaoa, Y.S., Chenb, Y.C. and Lin, H.M., "Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1988-1996, (2007).

12. Ma, C.X., Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Drilling assisted by ultrasonic elliptical vibration", *Key Engineering Materials*, Vol. 291-292, pp. 443-446, (2005).
13. Gwo L.C., Han J.L., "Using workpiece vibration cutting for micro-drilling", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*; Vol. 27, pp. 688-692, (2006).
14. Chang, S.S.F. and Bone, G.M., "Thrust force model for vibration-assisted drilling of aluminum 6061-T6", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 1070-1076, (2009).
15. Arul, S., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S.K. and Krishnamurthy, R., "The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*; Vol. 46, pp. 252-259, (2006).
16. Chang, S.S.F. and Bone, G.M., "Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6", *Precision Engineering*, Vol. 34, pp. 369-375, (2010).
17. Yohei, N., Kazuhiro, O., Kenichiro, H., Junichi, K., Takeshi, W. and Shinichi, M., "Attempt to increase step feed by adding ultrasonic vibrations in micro deep drilling", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 5, pp. 129-138, (2011).
18. Neugebauer, R. and Stoll, A., "Ultrasonic application in drilling", *Journal of Materials Processing Technology*; Vol. 149, pp. 633-639, (2004).